

# ALTERAÇÕES EM SÉRIES DE VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS: SEUS EFEITOS NOS VOLUMES DE ÁGUA A FORNECER PARA REGA E NA FIABILIDADE DO FORNECIMENTO DESSES VOLUMES A PARTIR DE ALBUFEIRAS

Maria Manuela PORTELA, IST, DECivil, SHRHA, [mps@civil.ist.utl.pt](mailto:mps@civil.ist.utl.pt)

João SANTOS, ESTIG, [joaof.santos@estig.ipbeja.pt](mailto:joaof.santos@estig.ipbeja.pt)

Maria de Fátima COELHO, IM, [Fatima.Coelho@meteo.pt](mailto:Fatima.Coelho@meteo.pt)

**Resumo:** Apresenta-se a concepção geral da abordagem e os procedimentos previstos aplicar para avaliar eventuais alterações no “desempenho” de albufeiras de aproveitamentos hidráulicos devidas a alterações nas características das séries hidrológicas (designadamente, nos valores médios e nos padrões de variação intra e inter anual) que se reflectam, quer nos escoamentos que afluem àquelas albufeiras, quer nos pedidos a satisfazer a partir das mesmas. Por “desempenho” de uma albufeira de um aproveitamento hidráulico entende-se a fiabilidade/garantia com que, ao longo do período de vida do aproveitamento, é assegurado o pedido para o qual foi, originalmente, estimada a capacidade útil a dispor na albufeira.

De entre os diferentes usos consumptivos afectos a albufeiras de aproveitamentos hidráulicos, considerou-se que estariam em presença apenas volumes de água para rega por tais volumes puderem ser bastante significativos e, especialmente, por serem particularmente sensíveis a eventuais alterações nas características de variáveis hidrológicas, com ênfase para a precipitação e para a temperatura. De facto, tais alterações, a confirmarem-se, terão reflexos na evapotranspiração e no balanço de água no solo e, consequentemente, nas necessidades de água para rega. Admite-se que possam verificar-se alterações, tanto nos valores das variáveis hidrológicas e das necessidades de rega, como nos padrões de variação desses valores ao longo do ano e entre anos.

Não obstante o trabalho que se apresenta corresponder ainda a uma fase exploratória da abordagem prevista implementar para avaliar o “desempenho” de albufeiras em cenários de eventual alteração climática, exemplificam-se, desde já e com base em dois casos de estudo, alguns dos procedimentos a aplicar, compreendendo, designadamente, a detecção de tendências em séries de variáveis hidrológicas, a introdução das tendências detectadas nos pedidos a satisfazer e, por fim, a simulação da exploração de albufeiras sujeita às tendências detectadas.

**Palavras-chave:** tendências em séries de variáveis hidro-climatológicas; simulação da exploração de albufeiras; capacidade útil; garantia do fornecimento.

## 1. Introdução. Objectivo

Apresentam-se, de modo resumido, os resultados preliminares de uma investigação em curso destinada a averiguar se as alterações detectadas em trabalhos antecedentes nas características de algumas séries hidrológicas, PORTELA e QUINTELA, 1998, 1999, 2001a, 2001b, independentemente de serem ou não entendidas como indícios de mudança climática, têm reflexos no “desempenho” de albufeiras de aproveitamentos hidráulicos destinadas ao abastecimento de água para usos consumptivos.

Por “desempenho” de uma albufeira de um aproveitamento hidráulico entende-se a fiabilidade/garantia com que, ao longo do período de vida útil do aproveitamento, é assegurado o pedido com base no qual foi estimada, na fase de projecto do aproveitamento, a capacidade útil da albufeira. Representa, portanto, a fiabilidade do fornecimento.

No anterior entendimento, o “desempenho” de uma albufeira pode ser avaliado de modo expedito por meio de uma das duas seguintes abordagens:

- para capacidade útil fixada no correspondente valor de projecto, estimativa, ao longo do período de vida útil do empreendimento, da garantia com que é assegurado um dado pedido;
- para garantia fixada no correspondente valor de projecto, estimativa, ao longo do período de vida útil do empreendimento, da capacidade útil que, face àquele pedido, assegura a garantia pretendida.

De entre os diferentes usos consumptivos afectos a albufeiras de aproveitamentos hidráulicos, considerou-se que estariam em presença apenas volumes de água para rega por tal utilização ser particularmente sensível a eventuais alterações nas características de variáveis hidrológicas, com ênfase para a precipitação e para a temperatura. De facto, as alterações, a confirmarem-se, terão reflexos, do ponto de vista da entidade bacia hidrográfica, no balanço hidrológico e, conseqüentemente, nos caudais fluviais, e do ponto de vista da utilização de água, na evapotranspiração e no balanço de água no solo e, logo, nas necessidades de água para rega. Admite-se que possam verificar-se alterações, tanto nos valores das variáveis hidrológicas e das necessidades de rega, como nos padrões de variação desses valores ao longo do ano e entre anos.

Não obstante o trabalho que se apresenta corresponder ainda a uma fase exploratória de abordagem prevista implementar para avaliar o “desempenho” de albufeiras em cenários de eventual alteração climática, exemplificam-se, desde já e com base em dois caso de estudo, alguns dos procedimentos a aplicar, compreendendo, designadamente, a detecção de tendências em séries de variáveis hidrológicas, a introdução das tendências detectadas nos pedidos a satisfazer e, por fim, a simulação da exploração de albufeiras sujeita às tendências detectadas

## 2. Procedimento geral

A análise aplicada para avaliar o “desempenho” de uma dada albufeira destinada a assegurar um dado volume de água para rega utilizou as seguintes etapas gerais, tendo algumas delas sido desenvolvidas, por ora, com base em procedimentos simplificados:

- a) Identificação dos postos ou estações com influência na bacia hidrográfica relativa à barragem que cria a albufeira e recolha, para tais postos ou estações, dos registos das variáveis hidrológicas e climatológicas relevantes para o cálculo da evapotranspiração e para a aplicação de modelos de transformação da precipitação em escoamento. Recolha de registos de caudais relativos à secção da barragem.
- b) Preenchimento de falhas/prolongamento de algumas das anteriores amostras de modo a definir um período de análise tão longo quanto possível (com dimensão desejavelmente superior a 50 anos) que mais facilmente permita evidenciar tendências eventualmente presentes nas variáveis que constituem aquelas amostras.

c) Estabelecimento do pedido a satisfazer a partir da albufeira e dos cenários a considerar na análise do “desempenho” da albufeira.

d) Apreciação do “desempenho” da albufeira baseada na simulação da sua exploração.

Tecem-se, seguidamente, breves considerações sobre algumas das etapas precedentes.

Importa, primeiramente, anotar que a análise proposta foi aplicada a nível mensal e que se considerou que a secção da barragem que criaria a albufeira coincidiria com a secção de uma estação hidrométrica de modo a, por ora, não ser necessário recorrer a procedimentos adicionais para estabelecer as afluências à origem de água. Trata-se, portanto, de uma **hipotética albufeira**.

Os registos de variáveis hidrológicas e climatológicas (também designadas, de modo abreviado, por variáveis hidro-climatológicas) de que é necessário dispor destinam-se, por um lado, a caracterizar as afluências à origem de água e, por outro lado, a modelar o pedido, neste último caso, mediante o cálculo intermédio da evapotranspiração. Este cálculo pode recorrer, na perspectiva mais aproximada, ao método de Thornthwaite para a evapotranspiração potencial, ou, desejando-se maior rigor, ao método de Penman-Montheith para a evapotranspiração de referência.

Contudo, mesmo para o cenário de hipotética albufeira criada por uma barragem localizada na secção de uma estação hidrométrica, é aconselhável prever que as amostras disponíveis de volumes ou de caudais afluentes possam ter dimensão inferior à das restantes variáveis hidro-climatológicas, pois, em Portugal Continental e na generalidade dos casos, a recolha de registos hidrométricos iniciou-se posteriormente à da dos demais registos pertinentes no contexto em menção. De modo a adoptar para período de análise o período em que se dispõe de informação hidro-climatológica, haverá que prever a geração de caudais fluviais baseada na aplicação de um modelo de transformação da precipitação em escoamento. Para tanto, podem ser aplicados modelos simples, fundamentados no balanço hídrico sequencial, ou recorrer a outro tipo de modelos mais complexos, como seja o modelo de Temez. Tanto um, como outro caso, é necessário dispor de valores da precipitação e da evapotranspiração.

Em resumo e para além de registos mensais de caudal (ou de volume) afluente à origem de água e de precipitação na respectiva bacia hidrográfica, os demais registos de que será necessário dispor dependem do método de cálculo da evapotranspiração, podendo respeitar, na situação mais ampla, a valores médios mensais das temperaturas média, máxima e mínima do ar, da velocidade do vento e das humidades relativas às 6 h e às 12 h e a valores mensais da insolação.

Muito provavelmente as amostras recolhidas exibirão falhas de registo. As falhas de caudal serão preenchidas mediante a aplicação do modelo de transformação da precipitação em escoamento utilizado para estender as séries hidrométricas para os períodos dispondo de registos de variáveis hidro-climatológicas. As falhas exibidas pelas demais amostras, desde que se tratem de falhas esporádicas em número pouco significativo (única situação em que a amostra poderá ser adoptada), poderão ser preenchidas mediante o recurso a correlações entre valores de amostras, utilizando eventualmente registos em postos/estações próximos dos utilizados no estudo.

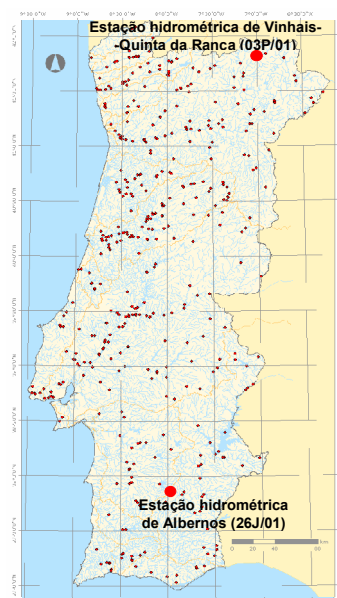
No que respeita ao pedido e dado que o estudo não incidiu sobre uma origem de água específica com um perímetro de rega associado, mas que considerou antes hipotéticas albufeiras com localização coincidente com a de estações hidrométricas, considerou-se que, na fase correspondente ao projecto de cada uma dessas hipotéticas albufeiras, o pedido anual a satisfazer a partir da mesma seria conhecido. Ao longo da vida útil do empreendimento, foi atribuído a tal pedido um padrão de variação inter e intra anual, para o que se atendeu ao padrão temporal exibido pelas variáveis mais condicionantes daquele pedido, como seja, no caso mais simples, a temperatura que determina muito directamente a evapotranspiração, ou a própria evapotranspiração. Dado que o padrão de variação temporal do pedido assim estabelecido atende apenas a condições climáticas, haverá que combiná-lo com uma sequência mensal de coeficientes culturais que, de algum modo, traduzam o ciclo vegetativo das culturas a regar.

Através das etapas precedentes ficam estabelecidos os dados de base mensais intervenientes na análise do “desempenho” da hipotética albufeira, restando definir os cenários a considerar na simulação da respectiva exploração, no que respeita a diferentes pedidos associados a diferentes garantias, e proceder àquela simulação, expressando os resultados que assim se obtenham em termos de fiabilidade do fornecimento. Como mencionado, neste contexto pode considerar-se que a capacidade útil foi fixada na fase de projecto, averiguando-se a garantia com que, ao longo do período de análise, o pedido é satisfeito, ou em alternativa, que a garantia foi fixada no seu valor de projecto, estimando-se a capacidade útil que, ao longo daquele período, assegura essa garantia.

### 3. CASOS DE ESTUDO

#### 3.1. Informação de base: variáveis climatológicas

Os procedimentos que têm vindo a ser desenvolvidos foram aplicados a dois casos de estudo consubstanciados por duas hipotéticas albufeiras, com localização coincidente com as estações hidrométricas de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01) e de Albernoa (26J/01) – **Figura 1**. As anteriores estações foram seleccionadas por disporem de períodos de registos já com alguma dimensão e por se esperar que, em face da sua diferente inserção geográfica – a primeira estação localiza-se no Norte do País e a segunda, no Sul – retratassem diferentes “desempenhos” de albufeiras.



**Figura 1** – Localização esquemática das estações hidrométricas de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01) e de Albernoa (26J/01)

(base: adaptada de mapa *Rede Udométrica Tradicional*, Atlas da Água, Galeria de Imagens, SNIRH).

Os anteriores casos de estudo receberam a designação abreviada de **Vinhais** ou **Caso 1** e de **Albernoa** ou **Caso 2**. As características pertinentes relativas às hipotéticas origens de água são indicadas no **Quadro 1** que contém ainda a identificação dos postos udométricos que, tendo influência nas bacias hidrográficas daquelas origens de água e possuindo séries longas de registos mensais, foram adoptados no estudo. Os pesos de tais postos nas bacias hidrográficas das estações hidrométricas são também indicados no **Quadro 1**.

A informação utilizada no estudo referente às demais variáveis climatológicas foi fundamentalmente obtida a partir dos registos disponíveis nas estações climatológicas de Bragança (03Q/01) – **Caso 1** – e de Beja (25J/02) – **Caso 2**. As coordenadas cartográficas M (m) e P (m) das anteriores estações são respectivamente (316224; 537542) e (223278; 116545).

**Quadro 1 – Estações hidrométricas utilizadas no estudo. Características gerais**

Estação hidrométrica						Postos udométricos com influência na bacia hidrográfica da estação hidrométrica			
Designação	Coordenadas de localização		Bacia hidrográfica principal	Curso de água	Área da bacia hidrográfica	Designação	Coordenadas de localização		Peso
	M (m)	P (m)					M (m)	P (m)	
Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01)	294388	539121	Douro	Rio Tuela	455	Vinhais (02O/02)	293547	541066	0.23
						Moimenta da Raia (02P/01)	295869	553749	0.49
						Montezinho (02Q/01)	311835	552285	0.21
						Celas (03P/01)	300772	527894	0.07
Albernoa (26J/01)	214876	98978	Guadiana	Ribeira de Terres	170	Aljustrel (26I/03)	197000	100109	0.05
						Castro Verde (27I/01)	203510	81240	0.74
						Trindade (26J/01)	221193	101924	0.21

O período de base utilizado na avaliação do “desempenho” das hipotéticas albufeiras foi de 63 anos, entre 1941/42 e 2003/04. Para tal período e para a bacia hidrográfica de cada caso de estudo, estimaram-se, para além das precipitações mensais, as evapotranspirações mensais para o que foram aplicados os métodos de Penman-Montheith, para a evapotranspiração de referência (PEREIRA *et al.*, 2000, e PEREIRA, 2004), e de Thornthwaite, para a evapotranspiração potencial (LENCASTRE e FRANCO, 1973, e QUINTELA, 1967). O cálculo da primeira das anteriores evapotranspirações utilizou registos médios mensais das temperaturas média, máxima e mínima do ar, da velocidade do vento e das humidades relativas às 6h e às 12 h e registos mensais da insolação. O método de Thornthwaite fez apenas intervir as temperaturas médias mensais do ar.

No **Quadro 2** apresentam-se algumas das características estatísticas – designadamente, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação – das séries mensais intervenientes na análise, incluindo as características das evapotranspirações mensais obtidas pelos dois métodos anteriormente referidos.

**Quadro 2 – Características estatísticas das séries mensais intervenientes na análise (período entre 1941/42 e 2003/04).**

		Caso 1 - Vinhais			Caso 2 - Albernoa		
		Média	Desvio-padrão	Coef. Variação	Média	Desvio-padrão	Coef. Variação
Precipitação (mm)		98.5	94.9	0.964	43.9	48.8	1.110
Temperatura média do ar	Média (°C)	12.2	6.0	0.493	16.5	5.4	0.328
	Máxima (°C)	17.7	7.2	0.409	22.5	6.9	0.309
	Mínima (°C)	6.7	4.9	0.733	10.4	4.0	0.382
Velocidade média do vento (km/h)		10.1	1.8	0.178	14.7	2.8	0.188
Humidade relativa média do ar	6 h (%)	84.3	6.7	0.079	87.1	5.7	0.065
	12 h (%)	61.8	14.7	0.238	58.9	15.1	0.256
Número de horas de sol descoberto (h)		219.1	92.4	0.421	235.2	80.9	0.344
Evapotranspiração	Penman-Monteith (mm)	83.0	54.2	0.653	107.5	63.1	0.587
	Thornthwaite (mm)	59.5	42.4	0.712	71.1	45.1	0.634

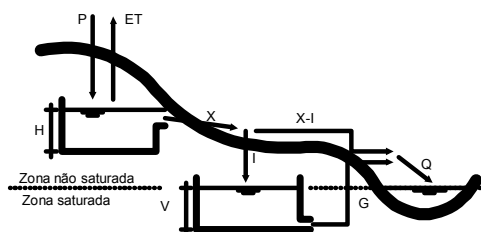
### 3.2. Informação de base: escoamentos mensais

Visto as estações hidrométricas de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01) e de Albernoa (26J/01) possuírem registos de caudal médio diário<sup>1</sup> apenas entre 1956/57 e 1996/97 e entre 1970/71 a 1989/90, respectivamente, houve que estimar os valores em falta para o período de 63 anos adoptado na análise (1941/42 a 2003/04), para o que se recorreu à aplicação, numa base mensal, do modelo de Temez e da técnica do balanço hídrico sequencial.

<sup>1</sup> Anota-se que apenas estes registos foram utilizados, uma vez que, para assegurar a maior fiabilidade dos dados, se optou por calcular os escoamentos mensais e anuais e as correspondentes alturas do escoamento a partir dos registos de caudais médios diários.

Para o efeito e tendo por base os períodos dispondo de registos de caudais, procedeu-se previamente ao estabelecimento dos parâmetros dos anteriores modelos, seguida da apreciação do seu ajustamento aos caudais observados e da selecção do modelo com melhor ajustamento que foi, então, utilizado para completar as séries de escoamento para o período adoptado na análise.

O modelo de Temez (MONREAL, 1992) estima o escoamento numa bacia hidrográfica a partir da precipitação e da evapotranspiração potencial (ou de Thornthwaite) que nela se verificam para o que considera o subsolo da bacia hidrográfica dividido numa zona superficial não saturada e numa zona subterrânea saturada. O armazenamento nas anteriores zonas é simulado por dois reservatórios, conforme se esquematiza na **Figura 2**.



**Figura 2** – Esquema do modelo de Temez.

O reservatório superficial recebe água por precipitação,  $P$ , e perde-a por evapotranspiração,  $ET$ , ou por exceder a sua capacidade de armazenamento. O excedente,  $X$ , infiltra-se ou escoam-se superficialmente. O reservatório subterrâneo recebe água por infiltração,  $I$ , e perde-a por esgotamento,  $G$ . O escoamento superficial total na bacia,  $Q$ , é dado pela soma do excedente superficial com a parcela proveniente da contribuição das reservas subterrâneas.

Os parâmetros do modelo de Temez respeitam ao coeficiente de escoamento,  $C$ , à capacidade máxima de armazenamento,  $H_{max}$ , à taxa máxima de infiltração,  $I_{max}$ , e à constante de recessão ou de esgotamento dos aquíferos,  $\alpha$ .

O parâmetro  $C$  (adimensional) é um coeficiente de perda de água para o escoamento superficial imediato. Em conformidade com o formalismo adoptado no modelo, valores elevados deste parâmetro conduzem a maiores retenções de água nas camadas superficiais do solo o que provoca o aumento da evapotranspiração real, com diminuição da precipitação efectiva e, consequentemente, do escoamento superficial e do escoamento total. A capacidade máxima de armazenamento,  $H_{max}$  (mm), representa a capacidade de armazenamento de água nas camadas superficiais do solo. Valores elevados deste parâmetro tendem a aumentar a água disponível para a evapotranspiração e consequentemente, conduzem à diminuição da infiltração, do escoamento superficial e do escoamento total. A taxa de infiltração máxima,  $I_{max}$  (mm), representa o valor teórico máximo da infiltração. Valores elevados deste parâmetro correspondem a uma infiltração elevada de que resulta a diminuição do escoamento superficial, sem que tal afecte o escoamento total de longo termo, mas apenas a sua distribuição temporal. Finalmente, a constante de recessão,  $\alpha$ , relaciona-se com a contribuição das reservas subterrâneas para o escoamento na rede hidrográfica. Uma variação do valor deste parâmetro não afecta os valores médios do escoamento mas apenas a sua distribuição temporal.

A aplicação do modelo de Temez pressupõe a estimativa prévia dos anteriores parâmetros, seguida da validação do modelo. Para tanto, o período com dados de escoamento e de evapotranspiração é subdividido em dois períodos distintos, sendo um utilizado para a calibração dos parâmetros e, o outro, para a validação do modelo com os parâmetros anteriormente calibrados.

A calibração é realizada testando, de forma sistemática, conjuntos diferentes de valores dos parâmetros do modelo e comparando os escoamentos que assim se alcançam com os escoamentos observados. Os desvios entre estes dois tipos de escoamentos são expressos por meio de uma função objectivo cujo valor tem de ser minimizado. O modelo com o conjunto de parâmetros anteriormente obtido é então validado mediante a sua aplicação aos dados de evapotranspiração e de precipitação no

período de validação, seguida da comparação entre escoamentos estimados e observados nesse mesmo período. O modelo com validade confirmada é finalmente aplicado à estimativa propriamente dita de escoamentos mensais.

Na aplicação do modelo de Temez aos casos de estudo adoptaram-se os seguintes períodos de calibração e de validação, correspondentes à utilização, no primeiro daqueles períodos, de sensivelmente dois terços dos dados mensais disponíveis:

**Vinhais – Caso 1:** calibração: 1956/57 a 1985/86; validação: 1986/87 a 1996/97;

**Albernoa – Caso 2:** calibração: 1970/71 a 1981/82; validação: 1982/83 a 1989/90.

A técnica do balanço hídrico sequencial (LENCASTRE e FRANCO, 1984, e VARENNE, 1972 - 1973) foi aplicada a cada caso de estudo adoptando para a capacidade máxima de água utilizável,  $S_{max}$ , o valor correspondente de  $H_{max}$  obtido pelo modelo de Temez, ou seja, sem que se tivesse procedido à optimização, no balanço hídrico sequencial, do valor de  $S_{max}$ . Não obstante este facto, optou-se por analisar separadamente o ajustamento entre caudais assim estimados e caudais observados tendo por base os períodos de calibração e de validação considerados para o modelo de Temez. Relativamente a tal técnica, importa ainda observar que se procedeu à sua aplicação adoptando, separadamente, a evapotranspiração mensal de referência (Penman-Montheith) e a potencial (Thornthwaite) e que o valor da água no solo nos meses em que a precipitação é inferior à evapotranspiração foi calculado de acordo com a seguinte equação (VARENNE, 1972 – 1973):

$$AS_i = S_{max} \cdot e^{L/S_{max}} \quad (1)$$

em que  $AS_i$  representa o valor da água no solo no mês  $i$ ,  $S_{max}$ , o valor da capacidade de água utilizável (considerado igual a  $H_{max}$ , como mencionado) e  $L$ , o valor da perda potencial de água (ou seja, da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração) acumulada desde o início do período seco até ao mês  $i$ .

Para apreciar o ajustamento de cada um dos modelos – Temez e balanço hídrico sequencial combinado com as duas formas de cálculo da evapotranspiração – utilizaram-se como medidas de ajustamento ou de erro e para além do coeficiente de correlação,  $r$ , entre escoamentos observados,  $Q$ , e estimados,  $\hat{Q}$ , a raiz quadrado do desvio quadrático médio, RMSE (*square root of mean square error*), e o erro absoluto médio, MAE (*mean absolute error*), avaliados por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{N}} \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_t - \hat{Q}_t|}{N} \quad (2)$$

em que  $N$  representa o número de valores de  $Q$  ou, de modo equivalente, de  $\hat{Q}$ . As anteriores medidas foram obtidas de modo separado para os períodos de calibração e de validação e para a soma desses períodos.

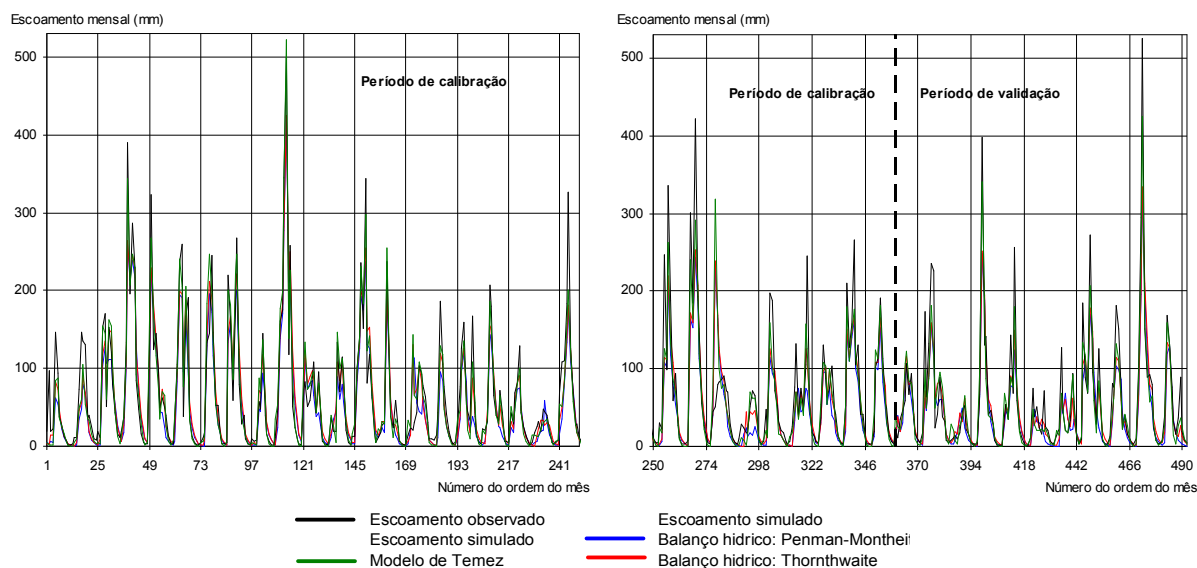
Para estes três períodos, são apresentadas, no **Quadro 3** e a título de exemplo baseado em **Vinhais**, algumas das características estatísticas dos escoamentos observados e simulados pelos diferentes modelos, bem como os correspondentes valores das medidas de ajustamento aplicadas. Incluíram-se também os valores dos parâmetros dos modelos. A **Figura 3** contém, também somente para aquele caso de estudo, a representação dos escoamentos observados e simulados no período de 41 anos compreendidos entre 1956/57 e 1996/97.

Tanto o **Quadro 3**, como a **Figura 3** evidenciam bons ajustamentos entre escoamentos observados e simulados por qualquer um dos modelos aplicados em **Vinhais**. Julga-se interessante realçar que as diferenças entre escoamentos simulados pela técnica do balanço hídrico sequencial apoiada na evapotranspiração, por um lado, de referência e, por outro lado, potencial são menores do que à partida se esperaria em face das menores evapotranspirações fornecidas pelo método de Thornthwaite. A anterior proximidade entre escoamentos simulados é explicada pelo facto de as

maiores diferenças entre valores mensais daquelas duas evapotranspirações ocorrerem no semestre seco, período durante o qual já não é a evapotranspiração que condiciona o superavit, mas os reduzidos ou inexistentes valores da precipitação e da água no solo. De tal circunstância resultam evapotranspirações reais inferiores às estimadas pelos métodos de Penman-Montheith ou de Thornthwaite, pelo que as diferenças entre estes dois métodos diminuem muito significativamente quando se comparam os escoamentos que deles resultam.

**Quadro 3 – Vinhais – Caso 1.** Modelo de Temez e balanço hídrico sequencial. Parâmetros dos modelos. Características estatísticas dos escoamentos mensais observados e simulados e medidas de ajustamento dos modelos.

		Vinhais - Caso 1					
		Características estatísticas			Medidas de ajustamento dos modelos		
		Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de variação (-)	r (-)	RMSE (mm)	MAE (mm)
Escoamentos mensais observados		Período: 1956/57 a 1985/86 (calibração)	67.08	79.718	1.188		
		Período: 1986/87 a 1996/97 (validação)	59.14	78.916	1.334		
		Período: 1956/57 a 1996/97	64.95	79.501	1.224		
Escoamentos mensais simulados	Modelo de Temez: C= 0.33; Hmax= 130 mm; lmax= 500 mm $\alpha = 0.05$	Período: 1956/57 a 1985/86 (calibração)	62.72	74.442	1.187	<b>0.926</b>	<b>30.46</b>
		Período: 1986/87 a 1996/97 (validação)	51.83	64.575	1.246	<b>0.954</b>	<b>26.82</b>
		Período: 1956/57 a 1996/97	59.80	72.025	1.204	<b>0.931</b>	<b>29.53</b>
	Balanço hídrico sequencial com base na evapotranspiração de referência (Penman-Montheith): Smax= 130 mm	Período: 1956/57 a 1985/86 (calibração)	53.54	62.643	1.170	0.896	38.90
		Período: 1986/87 a 1996/97 (validação)	44.74	54.487	1.218	0.895	41.23
		Período: 1956/57 a 1996/97	51.18	60.634	1.185	0.894	39.54
	Balanço hídrico sequencial com base na evapotranspiração potencial (Thornthwaite): Smax= 130 mm	Período: 1956/57 a 1985/86 (calibração)	60.86	66.055	1.085	0.907	34.60
		Período: 1986/87 a 1996/97 (validação)	50.28	55.813	1.110	0.913	36.96
		Período: 1956/57 a 1996/97	58.02	63.588	1.096	0.907	35.25



**Figura 3 – Vinhais – Caso 1.** Modelo de Temez e balanço hídrico sequencial. Escoamentos mensais observados e simulados entre 1956/57 e 1985/86 (período de calibração) e entre 1986/87 e 1996/97 (período de validação).

Não obstante a adequação de qualquer um dos modelos considerados no **Quadro 3** e na **Figura 3**, é possível reconhecer o melhor ajustamento do modelo de Temez, expresso pelos mais elevados valores do coeficiente de correlação e pelos mais baixos valores de RMSE e de MAE (uns e outros valores, destacados a negrito naquele quadro). Para **Albernoa** ocorreu uma situação em tudo semelhante, resumindo-se no **Quadro 4** os resultados equivalentes aos apresentados no **Quadro 3** para os escoamento observados e simulados pelo modelo de Temez.



**Quadro 4 – Albernoa – Caso 2.** Modelo de Temez. Parâmetros do modelo. Características estatísticas dos escoamentos mensais observados e simulados e medidas de ajustamento do modelo.

		Albernoa - Caso 2					
		Características estatísticas			Medidas de ajustamento dos modelos		
		Média (mm)	Desvio-padrão (mm)	Coef. de variação (-)	r (-)	RMSE (mm)	MAE (mm)
Escoamentos mensais observados	Período: 1970/71 a 1981/82 (calibração)	8.23	22.34	2.714	-	-	-
	Período: 1982/83 a 1989/90 (validação)	10.66	31.41	2.947	-	-	-
	Período: 1970/71 a 1989/90	9.20	26.31	2.860	-	-	-
Escoamentos mensais simulados pelo modelo de Temez: C= 0.3; Hmax= 200 mm; lmax= 25 mm, $\alpha= 0.1$	Período: 1970/71 a 1981/82 (calibração)	9.46	19.59	2.071	0.899	9.845	4.63
	Período: 1982/83 a 1989/90 (validação)	8.26	19.88	2.406	0.901	16.112	6.39
	Período: 1970/71 a 1989/90	8.98	19.67	2.191	0.885	12.728	5.34

Em face dos anteriores resultados, optou-se por aplicar o modelo de Temez para completar as séries de escoamentos mensais em **Vinhais** e em **Albernoa** para o período entre 1941/42 e 2003/04, adoptado no estudo. As características estatísticas das séries assim obtidas são apresentadas no **Quadro 5**.

**Quadro 5 – Vinhais – Caso 1 e Albernoa – Caso 2.** Características estatísticas dos escoamentos mensais no período de 63 anos, entre 1941/42 e 2003/04.

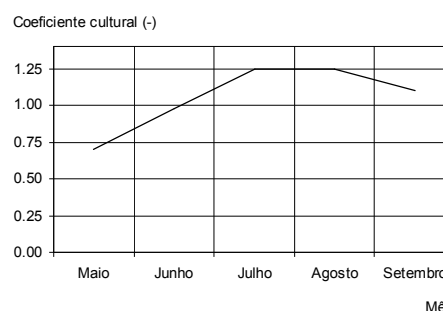
Vinhais - Caso 1	Média (mm)	62.27	Albernoa - Caso 2	Média (mm)	10.07
	Desvio-padrão (mm)	77.50		Desvio-padrão (mm)	24.92
	Coefficiente de variação (-)	1.245		Coefficiente de variação (-)	2.475

### 3.3. Modelação dos pedidos anuais e mensais atribuíveis a cada origem de água

Dado não ser possível afectar a cada hipotética albufeira um perímetro de rega a abastecer a partir da mesma, houve que simular o pedido de água em termos também hipotéticos, embora relacionados com as condições edafo-climáticas localmente ocorrentes. Para tanto, admitiram-se os seguintes pressupostos:

- A hipotética albufeira destina-se ao abastecimento de água para rega estival (pedido sazonal). O período de rega foi fixado em cinco meses, de Maio a Setembro, por ser esta a situação mais vulgar para aquele tipo de rega.
- O ciclo vegetativo das culturas a beneficiar ao longo do período de rega foi traduzido por meio de coeficientes culturais médios, estabelecidos tendo em conta as médias dos coeficientes culturais apresentados em DOORENBOS e PRUITT, 1975, para as diferentes culturas que se admitiu poderem ser praticadas na zona de cada hipotética origem de água. Os valores adoptados são representados na **Figura 4** tendo sido considerados constantes em qualquer ano do período de análise.

**Figura 4 – Coeficientes culturais mensais.**

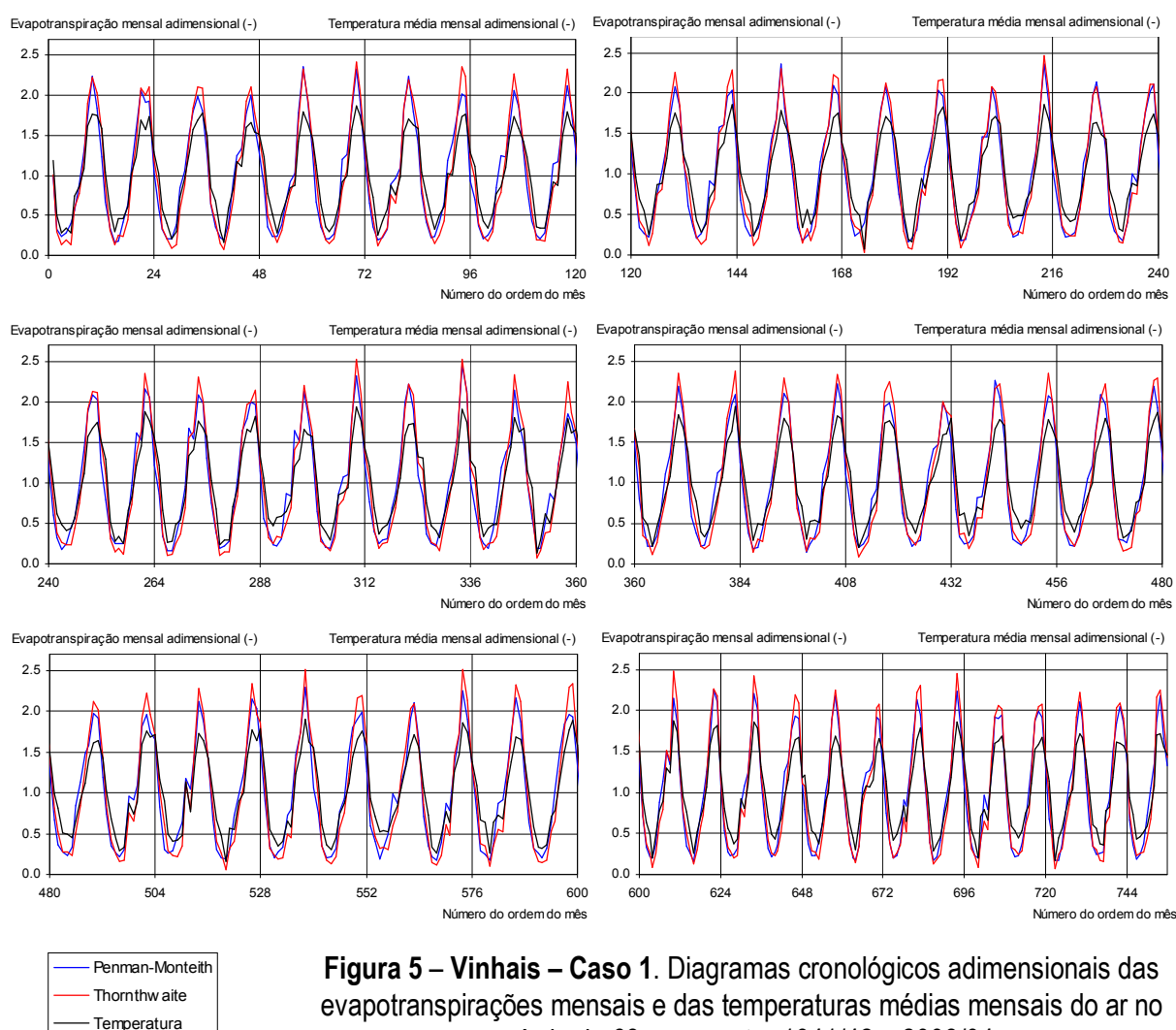


- A exploração da hipotética origem de água teve início no primeiro ano do período de 63 anos (1941/42 a 2003/04) adoptado na análise do “desempenho” daquela origem, admitindo-se que o pedido em tal ano é conhecido.

Partindo dos anteriores pressupostos, houve que definir o pedido a satisfazer em cada ano do período de análise, bem como atribuir a tal pedido uma repartição ao longo dos cinco meses em que se admitiu ocorrer o seu fornecimento.

Para tanto e reconhecendo que o pedido depende muito directamente da evapotranspiração, a qual, por sua vez, é fortemente determinada pela temperatura do ar (que é, aliás, o único parâmetro interveniente na evapotranspiração potencial), procedeu-se a uma análise detalhada dos valores mensais daquelas variáveis ao longo do período compreendido entre 1941/42 e 2003/04.

Assim, obtiveram-se primeiramente os diagramas cronológicos das evapotranspirações mensais de referência e potencial e da temperatura média mensal do ar, para o que tais valores foram adimensionalizados em cada ano por divisão pela correspondente média mensal, com obtenção dos resultados exemplificados na **Figura 5**, relativa a **Vinhais**.



A anterior figura evidencia que, não obstante as diferenças entre métodos de cálculo, no que concerne às evapotranspirações, ou entre as variáveis em presença, no caso mais lato, as séries adimensionalizadas apresentam andamentos muito próximos. Este facto sugere a possibilidade de adoptar os valores representados em qualquer um dos diagramas da **Figura 5** para descrever, em termos adimensionais, a sequência dos pedidos mensais ao longo do período de estudo.

Contudo e de modo a caracterizar a variabilidade mensal das evapotranspirações e da temperatura em cada um dos 63 anos daquele período (variabilidade intra anual), obtiveram-se os correspondentes coeficientes de variação mensal, calculados de acordo com a seguinte equação:

$$\sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (X_{i,j} - \bar{X}_j)^2} \div \bar{X}_j \quad (3)$$

em que, separadamente para cada uma das variáveis em presença (evapotranspiração de referência, evapotranspiração potencial e temperatura média do ar),  $X_{i,j}$  representa o valor da variável no mês  $i$  do ano  $j$  e  $\bar{X}_j$ , a média dos valores mensais da variável no ano  $j$  (valor médio mensal no ano  $j$ ). Os coeficientes de variação mensal assim obtidos para cada caso (em número de 63 para cada uma das variáveis para as quais se procedeu ao seu cálculo) foram caracterizados por meio das respectivas médias. Em complemento, calcularam-se as médias, desvios-padrão e coeficientes da variação dos valores de  $X_{i,j}$ .

Os resultados obtidos são apresentados no **Quadro 6** e permitem concluir que, para ambos os casos de estudo, a evapotranspiração potencial mensal, não obstante ser inferior à evapotranspiração de referência, apresenta maior variabilidade temporal, não só ao longo dos sucessivos meses do período analisado, como em média, ao longo de cada ano desse período, conforme exprimem os mais elevados valores (destacados no quadro a negrito), respectivamente, dos coeficientes de variação das séries mensais e das médias dos coeficientes de variação mensal.

**Quadro 6** – Período de 63 anos, entre 1941/42 e 2003/04. Características estatísticas dos valores mensais das evapotranspirações e das temperaturas médias do ar e médias dos coeficientes de variação mensal daquelas variáveis.

Vinhais - Caso 1				
Valores mensais		Evapotranspiração de referência (Penman-Montheith)	Evapotranspiração potencial (Thornthwaite)	Temperatura média do ar
	Média (mm)	83.05	59.53	12.22
	Desvio-padrão (mm)	54.20	42.40	6.02
	Coefficiente de variação (-)	0.6527	<b>0.7124</b>	0.4927
Média dos coeficientes de variação mensal (-)		0.6483	<b>0.7096</b>	0.4898
Albernoa - Caso 2				
Valores mensais		Evapotranspiração de referência (Penman-Montheith)	Evapotranspiração potencial (Thornthwaite)	Temperatura média do ar
	Média (mm)	107.47	71.13	16.45
	Desvio-padrão (mm)	63.06	45.12	5.39
	Coefficiente de variação (-)	0.5868	<b>0.6343</b>	0.3277
Média dos coeficientes de variação mensal (-)		0.5816	<b>0.6312</b>	0.3251

Atendendo a que pedidos com igual valor em média, mas com diferente variabilidade intra e inter anual, são tanto mais restritivos, em termos de “desempenho” da origem de água que os assegura, quanto mais acentuada é aquela variabilidade temporal, considerou-se que, uma vez que, ano a ano, se dispusesse do pedido a satisfazer, o mesmo seria repartido ao longo dos cinco meses de rega atendendo à repartição mensal nesse ano da evapotranspiração potencial, devidamente corrigida pelos coeficientes culturais mensais.

Ou seja, se  $R_j$  ( $\text{hm}^3$ ) representar o volume da água a fornecer no ano hidrológico  $j$  (com  $j=1,\dots,63$ ),  $\text{EVP}_{i,j}$  (mm) a evapotranspiração mensal no mês  $i$  (entre Maio e Setembro) daquele ano e  $k_i$ , o coeficiente cultural no mesmo mês  $i$ , o volume de água a fornecer no mês  $j$  do ano  $i$ ,  $R_{i,j}$  ( $\text{hm}^3$ ) foi avaliado por:

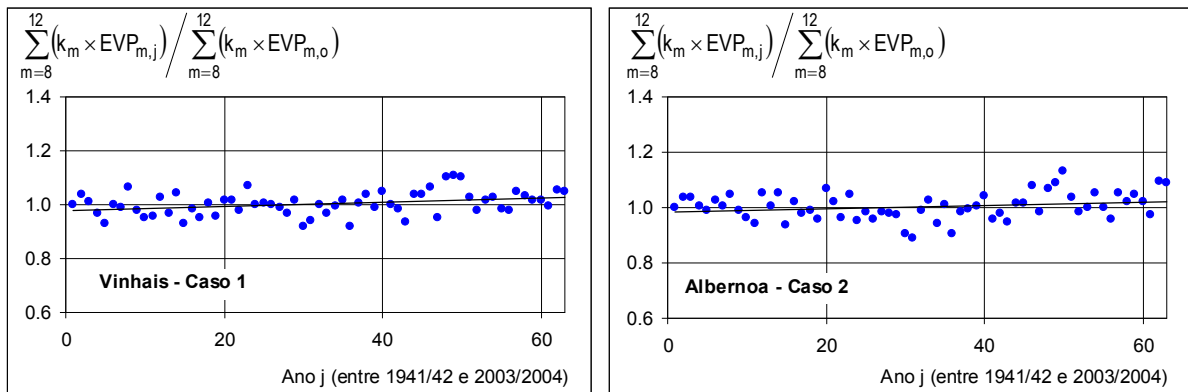
$$R_{i,j} = R_j \times \frac{k_i \times EVP_{i,j}}{\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,j})} \quad (4)$$

em que em denominador da fracção aparece o somatório, para o ano j, dos produtos dos coeficientes culturais pela evapotranspirações potenciais nos cinco meses (de Maio a Setembro) do ano j em que ocorre rega.

Resta, contudo, definir o modelo a aplicar para simular, ano a ano, o pedido  $R_j$ , partindo do pressuposto, anteriormente enunciado, de que o pedido no primeiro ano do período de análise (1941/42) é conhecido.

Para tanto e para cada ano compreendido entre 1941/42 e 2003/04, calculou-se o somatório, nos cinco meses de rega, dos produtos das evapotranspirações potenciais pelos correspondentes coeficientes culturais,  $\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,j})$ . Os 63 valores assim obtidos foram, seguidamente, adimensionalizados, por divisão pelo valor do somatório no ano zero ou inicial (1941/42) – quocientes  $\frac{\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,j})}{\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,o})}$  –, encontrando-se esquematicamente representados na

**Figura 6.**



**Figura 6** – Pontos representativos do quociente  $\frac{\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,j})}{\sum_{m=8}^{12} (k_m \times EVP_{m,o})}$  em longo dos 63 anos adoptados no estudo (1941/42 a 2003/04).

Os gráficos da anterior figura permitem reconhecer um ligeiro acréscimo ao longo dos anos dos valores correspondentes aos pontos neles representados, conforme se conclui dos segmentos de recta incluídos na figura e que traduzem as equações de regressão linear simples aplicada aos respectivos pares de valores (ano; quociente). Por utilização destas equações e tomando como referência os valores que fornecem para o ano inicial (1941/42), estimou-se o aumento anual do pedido em cerca de 0.078% e 0.060%, respectivamente, para **Vinhais** e para **Albernoa**.

Deste modo e para cada caso de estudo, uma vez que se fixe o pedido no ano de 1941/42, tornou-se possível, não só estimar o pedido em qualquer outro ano do período de análise (incrementando-o, relativamente àquele ano inicial, das percentagens anteriormente referidas), como também repartir o pedido estimado para esse ano pelos cinco meses de rega, por aplicação da eq. (4).

### 3.4. Simulação de exploração da albufeira de cada hipotética origem de água.

#### 3.4.1. Conceitos gerais

O “desempenho” de cada uma das hipotéticas albufeiras de **Vinhais** e de **Albernoa** foi apreciado de modo expedito admitindo como fixa a garantia associada ao fornecimento de um dado volume para rega e avaliando a capacidade útil da albufeira que, ao longo do tempo, assegura tal garantia.

Para tanto, a garantia foi entendida como a percentagem do número total de períodos de um intervalo de tempo, compreendendo numerosos anos, em que o volume de água solicitado é integralmente assegurado. Nos restantes períodos ocorrerão, portanto, restrições parciais ou totais ao fornecimento (MCMAHON, 1978, p. 17 e 1992, p. 27.9, GRIGG, 1996, p. 169, e LANNA, 1993, p. 714). Designando-se por  $N_T$  o número total de períodos considerados (com duração  $\Delta t$  constante) e por  $N_R$  o número desses períodos em que existem restrições ao fornecimento, a garantia,  $G$  (%), segundo a definição adoptada, é simplesmente dada pela seguinte equação:

$$G = \left(1 - \frac{N_R}{N_T}\right) \times 100 \quad (5)$$

A anterior definição adequa-se ao dimensionamento da capacidade útil de uma albufeira com base na simulação da sua exploração e utilizando directamente uma série de caudais ou de volumes a ela afluente, desde que a garantia exigida não seja muito elevada e que tal série respeite a um intervalo de tempo de tal modo longo que a estimativa de  $G$  não resulte significativamente afectada pelos erros de amostragem.

O dimensionamento da capacidade útil de uma albufeira que permite assegurar a satisfação de um dado pedido com uma garantia pré-fixada utiliza frequentemente técnicas de simulação da exploração de albufeiras baseadas na aplicação da equação da continuidade. Estas técnicas, não obstante a simplicidade do seu formalismo, permitem incorporar factores determinantes do dimensionamento, tais como a irregularidade do regime de afluências, a sazonalidade dos consumos, o efeito do estado inicial da albufeira, as perdas por evaporação ou outras perdas a partir da albufeira e as características de armazenamento da albufeira (curvas de volumes armazenados e de superfícies inundadas).

A simulação é efectuada em sucessivos períodos ou passos de cálculo,  $\Delta t$ , no início de cada um dos quais se supõe conhecido o volume armazenado na albufeira. O volume afluente à albufeira e o volume dela efluente em cada passo de cálculo constituem também dados do problema. A equação que, em cada  $\Delta t$ , traduz o balanço hídrico da albufeira entendida como um reservatório finito é dada por

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - D_t - E_t + P_t - L_t \quad (6)$$

com a restrição

$$0 \leq S_{t+1} \leq C \quad (7)$$

em que são

$C$  capacidade útil da albufeira ou seja, volume armazenável entre o nível de pleno armazenamento, NPA, e o nível mínimo de exploração, NmE,

$S_t$  e  $S_{t+1}$  volumes armazenados na albufeira respectivamente nos instantes  $t$  e  $t+1$ , desfasados de  $\Delta t$ , sendo, portanto,  $t+1 = t + \Delta t$ .

As demais grandezas da eq. (6) são os seguintes volumes ocorridos entre os instantes  $t$  e  $t+1$ :

$Q_t$  volume afluente à albufeira,

$D_t$  volume a fornecer pela albufeira,

$E_t$  volume evaporado a partir da albufeira,

$P_t$  volume precipitado sobre a albufeira,

$L_t$  volume correspondente a outras saídas de água da albufeira.

Em cada período  $\Delta t$  verificar-se-á uma restrição, total ou parcial, à satisfação do fornecimento  $D_t$  quando da aplicação da eq. (6) resultar  $S_{t+1} < 0$ . Neste caso, a simulação prosseguirá para o passo de cálculo seguinte considerando que, no seu início, é nulo o volume armazenado na albufeira ( $S_t = 0$ ). Quando resultar  $S_{t+1} > C$ , admite-se que no início do passo de cálculo seguinte se tem  $S_{t+1} = C$ , ou seja, que o volume que excedeu a capacidade útil da albufeira foi descarregado. Os passos de cálculo usualmente utilizados são o mês ou o dia.

Tendo por base a eq. (5), diferentes critérios têm sido propostos para definir o grau de garantia em face das restrições à satisfação do fornecimento verificadas na simulação da exploração de uma albufeira.

Assim, MCMAHON, 1978, p. 17 e LANNA, 1993, p. 714, propõem a definição de  $N_R$  e de  $N_T$  numa base mensal, ou seja, a garantia é entendida como a percentagem dos meses em que não existem restrições ao fornecimento. MCMAHON, 1992, p. 27.17 acrescenta que a transformação das restrições em garantias pode também ser efectuada numa base anual, considerando um ano com restrições aquele em que, num ou mais meses, não foi possível satisfazer integralmente o pedido. Neste contexto, a garantia representa a percentagem do número de anos em que houve satisfação integral dos volumes anuais solicitados. É também esta a noção apresentada por QUINTELA, 1979.

GRIGG, 1996, p. 169, sugere a aplicação do anterior critério, mas apenas para avaliar as garantias afectas ao fornecimento de volumes de rega, talvez por ter admitido que o não fornecimento de um volume para rega num dado mês possa comprometer definitivamente o ciclo vegetativo da cultura nesse ano. Para as demais utilizações, esse autor indica que a garantia deve ser definida numa base mensal, representando a percentagem do número de meses sem restrições ao fornecimento.

### 3.4.2. Condições gerais do cálculo

A análise efectuada para cada hipotética albufeira, consubstanciada pelo **Caso 1** ou pelo **Caso 2**, adoptou os seguintes procedimentos e pressupostos:

- A série de volumes afluentes à origem de água no período de 63 anos, entre 1941/42 e 2003/04, foi dividida em 34 sub períodos de 30 anos, cada sub período com início nos sucessivos anos daquele período; ou seja, exemplificando, o primeiro sub período decorreu entre 1941/42 e 1970/71, o segundo, entre 1942/43 e 1971/72; o décimo, entre 1950/51 e 1979/80, o trigésimo terceiro, entre 1973/74 e 2002/03 e finalmente o trigésimo quarto, entre 1974/75 e 2003/04.
- O pedido anual a satisfazer no primeiro ano do primeiro sub período de 30 anos, ou seja, em 1941/42, é conhecido, pois representa, por assim dizer, o pedido definido na fase de projecto da barragem que cria a hipotética albufeira. Apenas para a facilitar a apreciação de resultados, considerou-se que tal pedido seria igual a uma percentagem da afluência anual média à hipotética origem de água entre 1941/42 e 2003/04,  $\bar{Q}$ . Consideraram-se percentagens variáveis entre 10 e 70% de  $\bar{Q}$ . Anota-se que as afluências anuais médias que decorrem dos **Quadros 1** e **5** para **Vinhais** e **Albernoa** são, respectivamente,  $\bar{Q}_{Vinhais} = 340.01 \text{ hm}^3$  e  $\bar{Q}_{Albernoa} = 20.54 \text{ hm}^3$ .
- A partir do ano de 1941/42, o pedido foi anualmente aumentado em cerca de 0.078% e 0.060%, respectivamente, para **Vinhais** e para **Albernoa**, conforme justificado no **item 3.3**.
- Em cada ano, a repartição do correspondente pedido anual pelos cinco meses de rega foi efectuada por aplicação da eq. (4).
- Não obstante a garantia normalmente associada à rega ser de 80%, analisou-se também o “desempenho” da hipotética albufeira para garantias de 85 e 90%. A garantia foi entendida

numa base mensal, ou seja, considerou-se que existiria uma falha de fornecimento sempre que um dado pedido mensal não fosse integralmente satisfeito, ou seja, o grau de garantia foi assimilado à percentagem dos meses em que não ocorreram restrições ao fornecimento.

- Em cada um dos 34 sub períodos de 30 anos, o “desempenho” da hipotética albufeira foi avaliado estimando, para cada garantia adoptada, a capacidade útil de que seria necessário dispor para assegurar o fornecimento da sequência de pedidos anuais nesse sub período. Para tanto e para aquela garantia, procedeu-se à simulação da exploração da hipotética albufeira considerando não existirem outras saídas de água a partir da mesma para além do volume a fornecer ( $L_t=0$ ) e que se anulavam os efeitos de  $E_t$  e de  $P_t$ ; admitiu-se ainda que a albufeira se encontrava cheia no início da simulação da exploração ( $S_0=C$ ) e adoptou-se um passo de cálculo mensal. Anota-se que a duração, razoavelmente longa, de 30 anos, arbitrada para os sub períodos, pretendeu, de algum modo, reduzir os erros de amostragem que podem enfermar as técnicas de simulação de exploração de albufeiras.
- A capacidade útil em cada sub período foi expressa em valores absolutos e, apenas para facilitar a análise de resultados, em percentagem da afluência anual média à hipotética origem de água entre 1941/42 e 2003/04.
- Observa-se que, uma vez fixada a capacidade útil de uma albufeira e conhecidos os volumes mensais afluentes e a fornecer, a simulação baseada na eq. (6) permite obter directamente o grau de garantia que decorre daquela capacidade útil. Não foi, contudo, esta a aplicação dada à eq. (6), pois, nas simulações a que se procedeu para cada uma das hipotéticas albufeiras, as capacidades úteis que asseguravam a satisfação de um dado pedido com uma garantia pré-fixada constituíam os resultados a estimar. Houve, assim, que introduzir no algoritmo de simulação da exploração um processo iterativo para estimar capacidades úteis com garantias definidas a menos de um erro. O erro adoptado foi de  $\pm 0.01\%$ .

### 3.4.3. Resultados

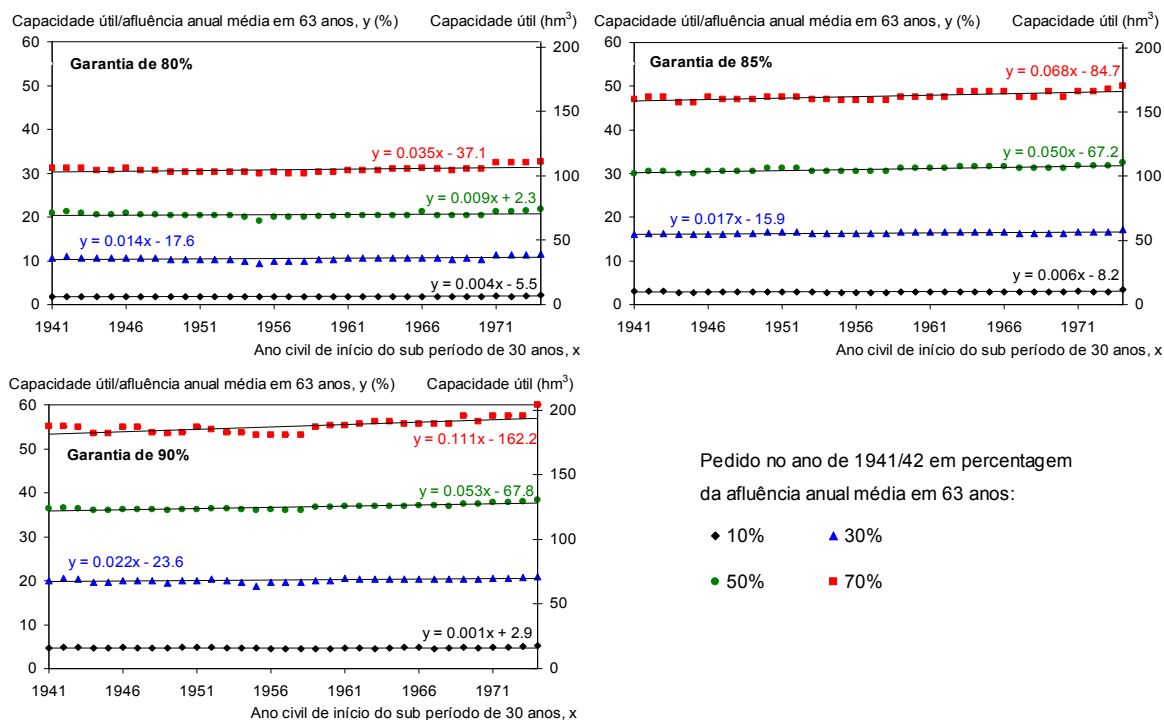
Os resultados da simulação da exploração das hipotéticas albufeiras de **Vinhais** e de **Albernoa** são apresentados nas **Figuras 7 e 8**, respectivamente. Cada figura contém três diagramas relativos às diferentes garantias consideradas na análise do “desempenho” daquelas albufeiras: 80, 85 e 90%. Em cada um desses diagramas os resultados surgem agrupados consoante o valor admitido para o pedido no ano de 1941/42: 10, 30, 50 e 70% da afluência anual média à origem de água entre 1941/42 e 2003/04.

Qualquer ponto representado num dos diagramas respeita a um sub período de 30 anos que, para o efeito, foi identificado pelo primeiro ano civil do ano hidrológico em que se inicia. O resultado atribuído a esse ponto representa a capacidade útil de que é necessário dispor na hipotética origem de água de modo assegurar, naquele sub período, o fornecimento de um dado pedido com uma dada garantia (esta última, identificada pelo título do diagrama em que o ponto se inclui e aquele outro, pela legenda que está associada a esse diagrama). Tal capacidade útil foi expressa em percentagem da afluência anual média à origem de água no período de 63 anos, entre 1941/42 e 2003/04 – eixo principal das ordenadas, à esquerda – e em valor absoluto – eixo secundário das ordenadas, à direita.

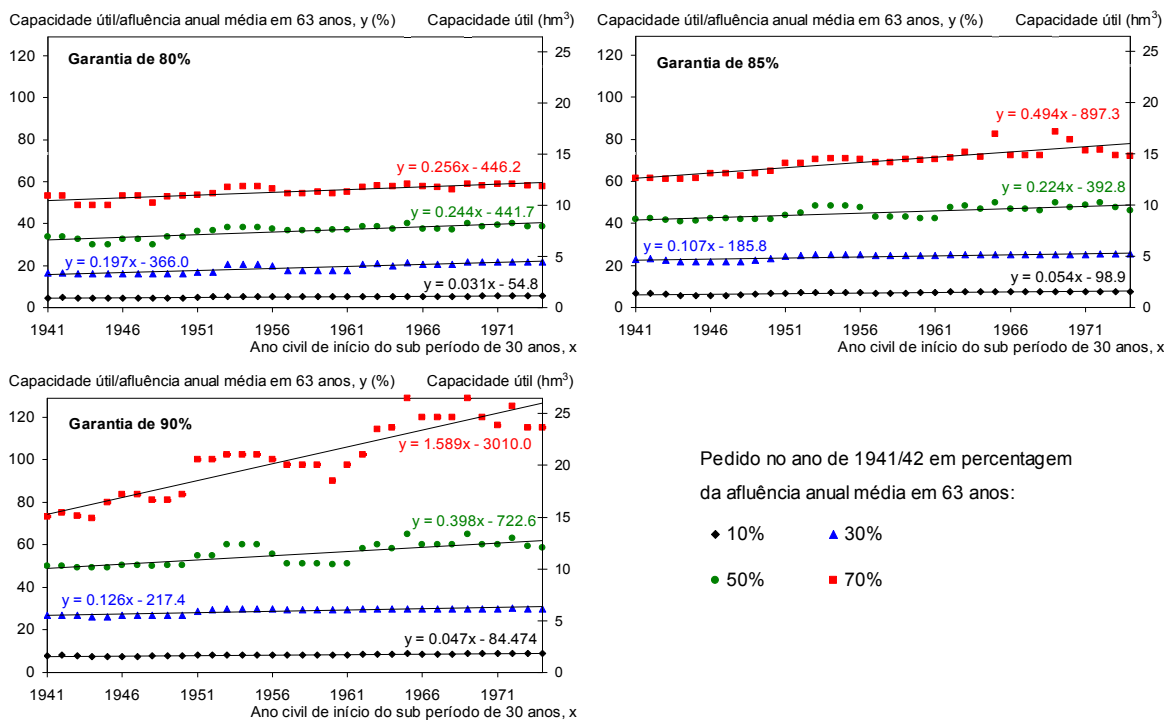
Cada diagrama contém por fim, a representação do segmento de recta que traduz a equação de regressão linear simples aplicada ao conjunto dos 34 pontos desse diagrama que correspondem a um dos quatro pedidos atribuídos ao ano de 1941/42, bem como a indicação da expressão matemática daquela equação.

No que respeita a **Vinhais**, a análise da **Figura 7** sugere que o “desempenho” da albufeira é sensivelmente o mesmo ao longo dos sucessivos sub períodos de 30 anos, pelo menos para pedidos em 1941/42 inferiores ou iguais a 30% ou a 50% de  $\nabla_{\text{Vinhais}}$ : a capacidade útil de que é necessário

dispor na hipotética albufeira para assegurar o fornecimento daqueles pedidos é praticamente a mesma ao longo dos sucessivos sub períodos em que se procedeu à simulação da exploração.



**Figura 7 – Vinhais – Caso 1.** Capacidades úteis da hipotética origem de água em períodos sucessivos de 30 anos cada, em função do valor do pedido no ano de 1941/42 e da garantia associada ao fornecimento desse pedido. Incremento anual do pedido de 0.078%



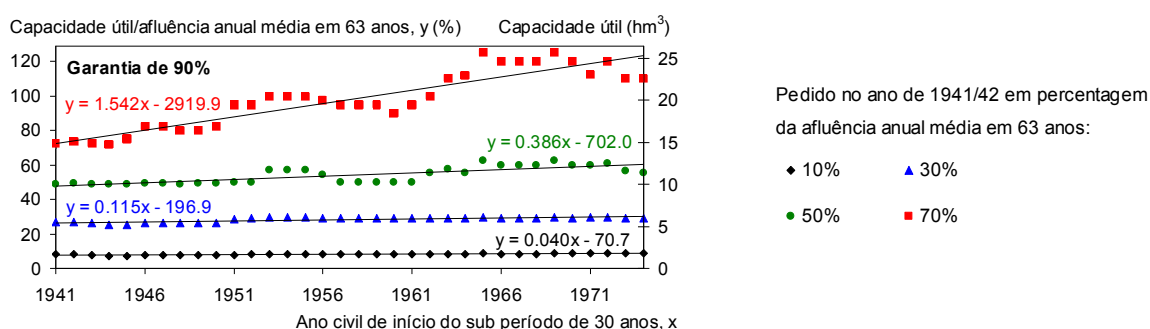
**Figura 8 – Albernoa – Caso 2.** Capacidades úteis da hipotética origem de água em períodos sucessivos de 30 anos cada, em função do valor do pedido no ano de 1941/42 e da garantia associada ao fornecimento do pedido. Incremento anual do pedido de 0.060%.



Existe, contudo, alguma “perda de fiabilidade” no fornecimento dos pedidos mais elevados, especialmente se associados às maiores garantias consideradas. Tal situação é já bem visível para o pedido de 70% de  $\nabla_{\text{Vinhais}}$  com 85 ou 90% de garantia em que os pontos dos correspondentes diagramas e as equações de regressão estabelecidas com base nesses pontos indicam a necessidade de dispor de capacidades úteis crescentes ao longo dos sucessivos sub períodos de 30 anos.

Em **Albernoa – Caso 2 (Figura 8)** a anterior “perda de fiabilidade” surge, desde logo, para pedidos de 30% de  $\nabla_{\text{Albernoa}}$ , tornando-se progressivamente mais evidente à medida que aumenta o pedido e a garantia associada ao seu fornecimento, de tal modo que os últimos sub períodos analisados indicam que, para assegurar o pedido de 70% de  $\nabla_{\text{Albernoa}}$  com a garantia de 90%, haveria que dispor de capacidades úteis superiores em mais de 50% às que decorreriam do dimensionamento da albufeira com base nos sub períodos iniciais.

Por fim, procedeu-se ainda à simulação da exploração da hipotética albufeira de **Albernoa** para a garantia de 90%, mas considerando que cada um dos diferentes pedidos atribuídos ao ano de 1941/42 se mantinha constante ao longo do tempo. Os resultados obtidos são apresentados na **Figura 9**.



**Figura 9 – Albernoa – Caso 2.** Capacidades úteis da hipotética origem de água em períodos sucessivos de 30 anos cada, em função do valor do pedido no ano de 1941/42 e para a garantia de 90%. Incremento anual do pedido de 0.000% (pedido constante).

A anterior figura evidencia ligeiras diferenças entre os declives das rectas de regressão nela incluídas e os declives das rectas de regressão do diagrama da **Figura 8** referente à garantia de 90%, diferenças que se julga resultarem do facto de os pedidos anuais subjacentes à **Figura 8** sofrerem um ligeiro incremento ano a ano, enquanto que os inerentes à **Figura 9** permanecem constantes ao longo dos sucessivos anos, embora correspondendo-lhes padrões mensais distintos de ano para ano. A **Figura 9** permite, contudo, concluir que, mesmo para pedido anual constante, é necessário dispor de capacidades úteis progressivamente maiores ao longo dos sucessivos sub períodos de 30 anos. Não decorrendo esta circunstância do aumento do pedido, só pode ser explicada pela alteração das características das séries mensais dos pedidos (alteração da variabilidade intra anual) e das afluências à hipotética albufeira (alteração de valores e da variabilidade intra e inter anual).

Embora com diferentes pertinências num ou noutro caso de estudo, e para um mesmo caso de estudo, em dependência do pedido e da garantia, julga-se poder concluir que foram detectadas evidências que apontam no sentido de as capacidades úteis estimadas para albufeiras com base em informação hidro-climatológica remota não assegurarem no presente a satisfação dos pedidos que lhes foram originalmente afectos com as garantias então previstas.

#### 4. Conclusões

Uma parte significativa das barragens actualmente existentes foi projectada num passado remoto, tendo as respectivas albufeiras sido dimensionadas com base em informação hidro-climatológica em anos muito distantes da actualidade.

Na perspectiva de alteração (atribuível ou não a cenários de mudança climática) dos valores e dos padrões de variação temporal de algumas daquelas variáveis hidro-climatológicas, importa avaliar se tais albufeiras ainda cumprem os critérios de projecto, ou seja, se as respectivas capacidades úteis continuam a assegurar os pedidos que lhes foram associados na fase de projecto com as garantias então previstas.

O estudo brevemente apresentado teve por objectivo reunir elementos e delinear metodologias que, de algum modo, permitissem avaliar o “desempenho” de albufeiras ao longo do tempo.

Os dois casos de estudo apontam no sentido de, em consequência de alterações a nível das características (valores e padrões temporais) dos escoamentos afluentes e dos pedidos a satisfazer ao longo dos anos, se poder registar uma progressiva perda de fiabilidade no fornecimento de água a partir de uma albufeira. Tal perda traduz-se no facto de, ao longo do tempo, ser necessário dispor de capacidades úteis progressivamente maiores para assegurar dados pedidos com uma mesma garantia.

Aparentemente, a perda de fiabilidade é mais evidente no Sul do País, talvez pelo facto de as alterações, a nível das variáveis hidro-climatológicas, serem aí maiores.

Por fim, anota-se que o trabalho efectuado carece ainda de desenvolvimento apreciável, não só mediante a aplicação a mais casos de estudo mas, fundamentalmente, de modo a relacionar/explicar as perdas de fiabilidade do fornecimento a partir de albufeiras com as alterações de comportamento dos caudais a elas afluentes e dos pedidos a satisfazer, quer consideradas individualmente, quer através do seu efeito combinado.

#### Bibliografia

- DOORENBOS, J. e PRUITT, W.O. 1975, *Guidelines for predicting crop water requirements*, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome, 179 p.
- GRIGG, N. S., 1996, *Water resources management. Principles, regulations and cases*. McGraw-Hill, New York, p. 169.
- LANNA, A. E., 1993, “Regularização de vazões em reservatórios”, *Hidrologia. Ciência e aplicação*. Organizador Carlos E. M. Tucci. Editora da Universidade/UFRGS, p. 703-725.
- LENCASTRE, A. e FRANCO, F. M., 1984, *Lições de hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- MCMAHON, T. A., 1978, *Reservoir capacity and yield*. Elsevier Scientific Publishing Company, Netherlands, p. 17
- MCMAHON, T. A., 1992, “Hydrologic design for water use”, *Handbook of hydrology*. Editor David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p. 27.1 – 27.48.
- MONREAL, T. E., 1993, Curso Internacional de Hidrologia General y Aplicada. Área de Hidrologia Superficial. Tomo I, II, III, IV, V e VI CEDEX, Madrid.
- PEREIRA L. S, ALLEN R. G, RAES D. e SMITH M., 2000, *Fao Irrigation and Drainage Paper nº 56 “Crop Evapotranspiration”*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, Rome.
- PEREIRA L. S., 2004, *Necessidades de Água e Métodos de Rega*. Colecção Euroagro, Publicações Europa América, Mem Martins.
- PORTELA, M. M.; QUINTELA, A. C., 1998, “Indícios de mudança climática em séries de precipitação em Portugal Continental”, *Recursos Hídricos*, Vol. 19 (2 e 3), pp. 41-74, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), ISSN 0870-1741, Lisboa.

- PORTELA, M. M. e QUINTELA, A. C., 1999, "A diminuição persistente e progressiva da precipitação verificada em Portugal Continental em épocas do ano", *IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa* (4º SILUSBA), 16 p., Coimbra, Portugal.
- PORTELA, M. M. e QUINTELA, A. C., 2001a, "A diminuição da precipitação em épocas do ano como indicio de mudança climática. Casos estudados em Portugal Continental". *Ingeniería del Agua*, Vol. 8(1), pp. 79-92, ISSN 1134-2196, Espanha.
- PORTELA, M. M. e QUINTELA, A. C., 2001b, "A diminuição da precipitação em Portugal Continental: casos estudados portugueses", *VII Conferência Nacional sobre Qualidade do Ambiente*, pp. 221-236, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- QUINTELA, A. C., 1967, *Recursos de águas superficiais em Portugal Continental*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- QUINTELA, A. C., 1979, "Inventário de recursos hídricos", *Seminário sobre gestão dos recursos hídricos no âmbito de bacias hidrográficas*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, APRH, Lisboa.
- VARENNE e MENDONÇA, P., 1972-1973, *Excerto das Lições de Hidráulica Geral e Agrícola*. Instituto Superior de Agronomia 4ª edição ciclostilada, Lisboa.